

На правах рукописи

ТЕПЛОВ Вадим Юрьевич

**РАЗВИТИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МЕТОДОВ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ
ИОНОСФЕРЫ**

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань, 2005

Работа выполнена в Казанском государственном университете имени В. И. Ульянова – Ленина

Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук, доцент

Шерстюков Олег Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор

Смоляков Борис Петрович

кандидат технических наук, доцент

Линдваль Владимир Романович

Ведущая организация - Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук (ИЗМИРАН) г. Троицк, Московская область.

Защита состоится 3 марта 2005 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском государственном университете им. В. И. Ульянова-Ленина
По адресу: 420008, Г. Казань, ул. Кремлевская, 18, физический факультет, ауд. 210.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н. И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан _____ февраля 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ. – мат. наук

А. В. Карпов

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Радиоволны различных диапазонов при распространении в околоземном пространстве подвергаются воздействию со стороны плазменной оболочки Земли – ионосферы. Наибольшему влиянию со стороны ионосферы подвержены электромагнитные волны коротковолнового (КВ) диапазона (1 – 30 МГц). В зависимости от текущих параметров ионосфера в КВ диапазоне может, как способствовать передаче информации на дальние расстояния, вплоть до кругосветных, так и препятствовать даже на коротких радиотрассах из-за проявления эффектов многолучевости и частотной дисперсии. Иногда приходится сталкиваться и с полным разрушением канала связи за счет эффектов аномального поглощения [1,2]. Несмотря на неустойчивый характер распространения радиоволн КВ диапазона и в настоящее время продолжают оставаться актуальными проблемы исследования ионосферных каналов радиосвязи для обеспечения оптимального проектирования цифровых систем передачи данных и систем пеленгации источников радиоизлучения (в том числе однопозиционных).

Не менее важны и ионосферные исследования, связанные с мониторингом глобальных процессов в термосфере Земли. Ионосферная плазма чувствительна к электрическим и магнитным полям и подвержена воздействиям, как из космического пространства, так и с поверхности Земли (включая антропогенные). Ионосфера, являясь средой распространения различного рода волн (внутренних гравитационных, акустических и др.) [3], реагирует на внешние воздействия изменением своих параметров, что позволяет отслеживать протекание аномальных явлений различной природы и, зачастую, предсказывать их [4,5,6].

Проводить исследования динамических процессов в ионосфере можно на основе анализа интерференционной картины в точке приема, на основе информации о вариациях амплитуды сигнала, доплеровских сдвигов частоты и углов прихода радиоволн. Эту задачу можно решить, используя метод частотно - пространственно разнесенного приема (ЧПРП) [7]. В отличие от методов пространственного разделения радиолучей по углам прихода с помощью антенных решеток (подобные системы обычно состоят из 10 и более антенн и имеют характерные размеры антенного поля до единиц километров), метод ЧПРП не требует больших антенных полей (требуемые характерные размеры десятки метров). Используя метод ЧПРП, можно создавать измерительные системы с малогабаритными и сравнительно дешевыми антенными системами и малым количеством приемных каналов. При использовании метода ЧПРП разделение радиолучей проводится в частотной области на основе информации о частотных и фазовых параметрах принимаемого сигнала после проведения спектральной обработки сигналов в точках разнесенного приема. Подобные системы могут обеспечивать непрерывный мониторинг ионосферных параметров, используя узкополосные сигналы постоянно действующих КВ станций (точного времени, радиовещательных) [7]. Дополнительный толчок в развитии интерференционных методов получили вследствие быстрого развития современных средств аналоговой и вычислительной техники, методов аналогово – цифрового преобразования и цифровой обработки сигналов.

Системы ионосферного мониторинга существуют по всей поверхности планеты. В России подобная сеть на основе цифровых ионозондов и доплеровских систем развернута в Восточной Сибири (Иркутск, Якутск, Жиганск, Норильск). Она ориентирована, в основном, на исследования высокоширотной ионосферы и авроральных эффектов. Подобные исследования на западной территории России в последнее время проводятся нерегулярно. Создание системы пассивного мониторинга ионосферы в Казанском университете позволяет с малыми финансовыми затратами расширить существующую

сеть измерительных систем и дополнить базу экспериментальных данных о среднеширотной ионосфере.

Одним из факторов, ограничивающих применимость метода ЧППП к исследованиям процессов в ионосфере, является нестационарность этих процессов. Нестационарность исследуемых процессов приводит к ограничению частотной разрешающей способности при применении классических методов спектрального оценивания. Для ионосферных сигналов разрешение ограничено временной апертурой 20 – 300 сек в зависимости от условий распространения. Обеспечиваемое в наихудшем случае спектральное разрешение 0.05 Гц (для времени стационарности 20 сек) не удовлетворяет требованиям по разделению соседних спектральных составляющих ионосферного сигнала, т.к. довольно часто частотный сдвиг между ними существенно меньше (<0.01 Гц). Неполное разделение спектральных составляющих приводит к резкому ухудшению точностных характеристик при определении углов прихода и невозможности раздельного определения доплеровских сдвигов частоты для различных мод распространения.

Перечисленные выше ограничения относятся к так называемым непараметрическим (классическим) методам спектрального оценивания. В их основе, как правило, лежит гармонический анализ Фурье, обеспечивающий спектральное разрешение обратно пропорциональное времени анализа. Параметрические методы спектрального оценивания (ПМСО) могут улучшить спектральное разрешение при том же времени анализа. Разработка и применение новых ПМСО позволяет существенно улучшить разрешение близкорасположенных спектральных линий [10], расширяя возможности применения метода ЧППП. Поскольку алгоритмы ПМСО относятся к числу некорректно поставленных задач [8,9], то достоверность получаемых результатов сильно зависит от вида шума и особенностей измерительного тракта. Численный эксперимент не всегда позволяет оценить помехоустойчивость ПМСО и решить задачу верной интерпретации результатов из-за несоответствия используемых моделей реальному шуму. Особенности измерительного тракта в численном эксперименте, как правило, вообще не учитываются [11].

Из дополнительных трудностей, привносимых в эксперимент ионосферой, следует отметить не только постоянную изменчивость ее параметров, но и сложность интерпретации результатов и неповторяемость условий проведения эксперимента. Это затрудняет объективную оценку результатов использования ПМСО.

Для обеспечения проверки качества работы ПМСО на реальных сигналах, прежде чем использовать их в ионосферном эксперименте, можно использовать временные ряды, полученные в измерительных приборах с близкими к ионосферным системам характеристиками. Главным требованием, предъявляемым к системе, в этом случае становится обеспечение высокого уровня повторяемости и более легкой интерпретации результатов, чем в ионосферном эксперименте. Подобными свойствами обладают системы для исследования явления ядерного – магнитного резонанса (ЯМР). Динамические и шумовые характеристики измерительных трактов их подобны характеристикам трактов радиолокационных систем и многие из них используют радиосигналы КВ – диапазона. По спектральному составу ЯМР сигналы похожи на доплеровские спектры ионосферных сигналов, а разрешающая способность при оценивании спектрального состава для сигналов ЯМР ограничена временами релаксации исследуемых образцов (аналог времени стационарности). Расстояния между спектральными пиками также имеют характерные разносы со значениям 0.01 – 10 миллионных долей (МД) рабочей частоты. Однако, в случае исследования сигналов ЯМР можно обеспечить многократную повторяемость условий эксперимента и можно предсказывать результат, используя хорошо изученные образцы [12].

Таким образом, метод ЧПРП позволяет создавать высокоэффективные системы непрерывного, пассивного ионосферного мониторинга. Область применения измерительных систем ЧПРП можно расширить за счет внедрения современных методов спектрального оценивания. Для проверки разрабатываемых методов спектрального оценивания можно использовать не только численное моделирование и ряды экспериментальных ионосферных данных, но и временные ряды, получаемые с помощью управляемого генератора сигналов со сложным спектром, в качестве которого используется спектрометр для исследования вещества методом ядерного магнитного резонанса.

Цель и основные задачи диссертационной работы.

Основной целью работы является повышение точностных характеристик доплеровских и интерференционных систем дистанционного радиомониторинга ионосферы.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Создание многоканального автоматизированного фазоугломерного комплекса мониторинга ионосферы с применением антенной системы с малой базой (характерные размеры меньше длины волны) в режиме наклонного зондирования узкополосными сигналами КВ - диапазона.
2. Получение количественных оценок предельно достижимых точностных характеристик доплеровского фазоугломерного измерительного комплекса дистанционного ионосферного мониторинга и создание механизмов компенсации ошибок.
3. Экспериментальное определение частотно-фазовых характеристик сигналов, отраженных и рассеянных ионосферой.
4. Создание методов и систем для тестирования алгоритмов спектрального оценивания на основе измерительных комплексов ядерного магнитного резонанса.
5. Разработка методов параметрического спектрального оценивания с повышенной разрешающей способностью для оценивания спектральных характеристик ионосферных сигналов в системе дистанционного мониторинга ионосферы.
6. Проведение сравнительного анализа эффективности методов спектрального оценивания при работе с сигналами отраженными от ионосферы.

Научная новизна.

Разработан и создан комплекс дистанционного мониторинга ионосферы. Экспериментально подтверждена возможность использования антенной системы с малой базой (характерные размеры меньше длины волны) для использования в угломерных измерениях ионосферного сигнала с высокой точностью.

Получены оценки точности измерения углов прихода в КВ – диапазоне для доплеровского фазоугломерного комплекса с малой базой. Для измерения углов прихода создана антенная система несимметричная в горизонтальной плоскости.

В результате внедрения адаптивных механизмов компенсации ошибок аппаратные погрешности измерений имеют размер на порядок меньший, чем ошибки, определяемые сложным спектральным составом сигнала и процессами в среде распространения.

Впервые метод спектрального оценивания на основе разложения по функциям с гибкой структурой применен к сигналам ионосферного зондирования и к сигналам ядерного магнитного резонанса.

Научная и практическая значимость.

Создан многоканальный автоматизированный доплеровский фазоугломерный комплекс ионосферного мониторинга с антенной системой с малой базой. Комплекс успешно применяется для решения задач ионосферного мониторинга.

Разработаны методики проведения длительных измерений в автоматическом режиме

на трассах наклонного зондирования ионосферы в КВ – диапазоне. Разработано программное обеспечение для доплеровского фазоугломерного комплекса.

Разработаны алгоритмы для реализации метода спектрального оценивания на основе разложения по функциям с гибкой структурой. Алгоритмы применены к сигналам наклонного зондирования ионосферы.

Проведены длительные циклы измерения с помощью доплеровского фазоугломерного комплекса с использованием сигналов различных КВ - радиостанций. Накопленный материал позволяет проводить анализ длинных временных рядов данных при изучении процессов в нижней термосфере Земли.

Полученные результаты представляют интерес при создании систем пеленгации источников излучения в КВ диапазоне.

Проведенная модернизация ЯМР - спектрометра высокого разрешения “Tesla BS-587” позволяет использовать его радиочастотные блоки совместно с современными средствами вычислительной техники, а результаты измерений сохранять на долговременных IBM PC совместимых носителях информации.

Созданные узлы малогабаритного микропроцессорного ЯМР релаксометра – диффузометра с гибким управлением и программное обеспечение используются в измерительных системах и в учебном процессе.

Основные положения, выносимые на защиту:

Методики определения углов прихода радиоволн в КВ –диапазоне на основе результатов измерений доплеровского фазоугломерного комплекса наклонного зондирования ионосферы с использованием узкополосных сигналов и антенной системы с малой базой.

Оценки достижимых точностей измерительной системы с малой базой при использовании в режимах доплеровского и интерференционного радиозондирования ионосферы и методики компенсации ошибок.

Методика оценки применимости параметрических методов спектрального оценивания к ионосферным сигналам с привлечением сигналов другого физического происхождения, полученных радиофизическими методами на сходной радиоаппаратуре (ЯМР сигналы).

Методика и результаты применения разработанного параметрического метода спектрального оценивания с повышенной разрешающей способностью к сигналам наклонного зондирования ионосферы. Результаты сравнения разработанного метода спектрального оценивания с методом Прони, показывающие его преимущества в применении к ионосферным сигналам.

Личный вклад автора.

Основные результаты диссертации получены либо лично автором, либо при его прямом участии.

Автором разработаны блок - схемы и электрические принципиальные комплексы дистанционного мониторинга ионосферы. Автором разработаны методики проведения эксперимента, измерительное и управляющее программное обеспечение для комплекса ионосферного зондирования.

Автором разработаны методики анализа и на их основе получены количественные оценки достижимых точностей при измерении угловых характеристик ионосферного сигнала на основе доплеровского фазоугломерного измерительного комплекса с малой базой.

Совместно с Бочкаревым В.В. разработан новый алгоритм спектрального оценивания на основе метода разложения по функциям с гибкой структурой. Характеристики алгоритма проверены на различных рядах модельных и реальных экспериментальных

данных.

Автором созданы автоматизированные системы сбора данных на основе ЯМР - спектрометров высокого разрешения и релаксометров. Полученные экспериментальные временные ряды применены автором при тестировании алгоритмов спектрального оценивания.

Автор принимал участие в постановке задач и проведении нескольких длительных циклов измерений в период с 1989 по 2003 гг.

Апробация результатов.

Основные результаты работы опубликовывались в Российских и международных реферируемых научных журналах и представлялись на конференциях: «Ионосфера и взаимодействие дециметровых радиоволн с ионосферной плазмой» (г. Звенигород, 1989), на XVI, XVII, XVIII, XIX, XX Всесоюзных (Всероссийских) конференциях по распространению радиоволн (Харьков, 1990; Ульяновск, 1993; С-Петербург, 1996; Казань, 1999; Н. Новгород, 2002), Структура и динамика молекулярных систем. (Йошкар-Ола, 1998), XII школе-конференции по дифракции и распространению радиоволн (Москва, 2001), LVII Научной сессии посвященной дню Радио (Москва, 2002), Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы» (Москва, 2002), на VI, VII Байкальских международных школах по фундаментальной физике (Иркутск, 2003; Иркутск, 2004), Международной конференции по антеннам и распространению радиоволн (Киото, Япония, 1996), Международной конференции CIT (Аустин, США, 1997), на XXXIII, XXXIV, XXXV ассамблеях COSPAR (Варшава, Польша, 2000; Хьюстон, США, 2002; Париж, Франция, 2004), на XXV генеральной ассамблее EGS. (Ницца, Франция, 2000), на III и V международных конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2000; Москва, 2002), на III международной конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ» (Таганрог, 2003), на V международной конференции «Проблемы геокосмоса» (Санкт-Петербург, 2004), на IX Всероссийской конференции «Физические проблемы экологии (экологическая физика)» (Москва, 2004), на XI Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана» (Томск, 2004), на XIV международной Крымской конференции «СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2004), а также докладывались на научных семинарах и ежегодных отчетных конференциях Казанского Государственного Университета (1992 - 2004).

Публикации.

Основные положения диссертации опубликованы в 80 печатных работах (10 в рецензируемых журналах, 32 в реферируемых сборниках и трудах конференций, 38 в виде тезисов докладов) и 4-х научно-исследовательских отчетах.

Реализация результатов работы.

1. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении госбюджетных тем кафедр радиоастрономии и радиофизики Казанского государственного университета. Темы: «Разработка перспективных дистанционных методов и средств диагностики состояния ионосферы» N гос. рег. 01910050058, 1991 – 1995 гг. (исполнитель); «Исследование физических характеристик верхней атмосферы и солнечно – земных связей радиофизическими методами» N гос. рег. 01970008271, 1996 – 2000 г.г. (исполнитель); «Радиофизические основы информационных систем» N гос. рег. 01200203344, 2001 – 2005 г.г. (исполнитель);
2. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении следующих проектов:
 - РФФИ 98-03-33178 (1998-2000) Морфология надмолекулярных структур и молекулярная подвижность в гетерогенных полимерах (исполнитель);

- РФФИ 01-05-65251 (2001-2003) Волновые процессы и турбулентность в термосфере (исполнитель);
 - РФФИ 03-07-90288 (2003-2005) Геофизическая информационная система Казанского университета (исполнитель);
 - РФФИ 03-05-96187 (2003-2005) Исследование термодинамического состояния нижней, средней и верхней атмосферы Земли на основе мониторинга фундаментальных параметров нейтральной и заряженной компонент (исполнитель);
3. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении хоздоговорных работ: «Тренд» (заказчик НИИДАР г. Москва, 1986-1989г.г.); «Тренд-90» (заказчик НИИДАР г. Москва, 1990 г.); «Морек» (заказчик НИИДАР г. Москва 1990 г.); «Недра-ПО» (заказчик КНИРТИ г. Казань, 1995-1998г.г.); «Недра-АП» (заказчик КНИРТИ г. Казань, 1995-1998 г.г.); «Релакс» (заказчик КХТИ, г. Казань, 1999-2001 г.г.). Аппаратные разработки и программные пакеты были использованы при изготовлении многофазного расходомера «Недра-40» ОАО «Радиоприбор» г. Казань. Система проходит сертификацию и опытную эксплуатацию.
 4. Результаты использованы в учебном процессе Казанского университета при составлении программ курсов «Автоматизация научных исследований», «Аппаратное обеспечение эксперимента», «Микропроцессоры в радиофизике», лабораторный практикум «Распространение радиоволн».

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы. Она содержит 160 страниц основного текста, 40 иллюстраций, 6 таблиц и список цитируемой литературы из 130 наименований.

Краткое содержание работы.

Во **введении** дана общая характеристика работы. Раскрыта ее актуальность, сформулированы цель работы и основные положения, выносимые на защиту, обоснована научная новизна, научная и практическая значимость выполненных исследований. Приведено краткое содержание работы.

В **первой главе** рассматривается актуальность экспериментальных исследований ионосферных параметров и представлен краткий обзор известных методов радиозондирования ионосферы.

В **разделе 1.1** рассматриваются возможности применения при исследовании динамических процессов в ионосфере классических методов радиозондирования. Проводится анализ применимости методов импульсного зондирования, зондирования сигналами с линейно - частотной модуляцией (ЛЧМ), некогерентного рассеяния и частичных отражений, а также метода радиопросвечивания ионосферы с использованием сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS.

В **разделе 1.2** рассматриваются интерференционные методы радиозондирования ионосферы. Представлены краткие характеристики доплеровского, спектрально-фазового, спектрально-поляризационного и спектрально-аналитического подходов при изучении интерференционной картины ионосферного сигнала в КВ - диапазоне.

Показано, что на основе радиоинтерференционного метода частотно - пространственно разнесенного приема (ЧПРП) можно организовать непрерывный, пассивный мониторинг параметров ионосферы, используя сеть КВ станций (радиовещательных, точного времени и др.). Использование сигналов радиовещательных КВ станций позволяет организовывать трассы различной ориентации и протяженности, на различных рабочих частотах, не организовывая специальных пунктов излучения. В тоже время, измеряемые параметры (доплеровские сдвиги частоты, углы прихода радиоволн,

амплитудные и фазовые искажения) позволяют наиболее полно оценивать влияние среды распространения на радиоволны КВ - диапазона.

В **разделе 1.3** сформулированы основные выводы первой главы диссертационной работы.

Во **второй главе** представлены и описаны разработанные блок – схемы измерительного оборудования и программного обеспечения, используемого при радиозондировании ионосферы. Приводятся оценки достижимых точностей при измерении углов прихода с помощью разработанного и применяемого в эксперименте доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр». Представлена блок-схема и результаты тестирования цифрового приемника измерительного комплекса.

В разделе 2.1 рассматривается структура измерительного тракта многоканального доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр», разработанного автором. Проводится обоснование выбранных методов построения радиоизмерительного тракта [13, 14]. Блок – схема комплекса приведена на рис. 1.

В состав комплекса входит антенно-фидерная система, включающая в себя антенны (Ан), антенные усилители (АУ) и фидеры (Ф); четырехканальное приемное устройство (РПУ); система калибровки амплитуд и фаз, включающая в себя электронный коммутатор (ЭК), синтезатор калибровочного сигнала (AD9850), управляемый аттенюатор (УА); Внешний первый гетеродин (AD9852); блок смесителей и фильтров (БС и ФТ); управляющий контроллер (УК); высокостабильный стандарт частоты (Ч1-50); квадратурный генератор (КГ AD9854); блоки аналого-цифрового преобразования (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) регулятора усиления.

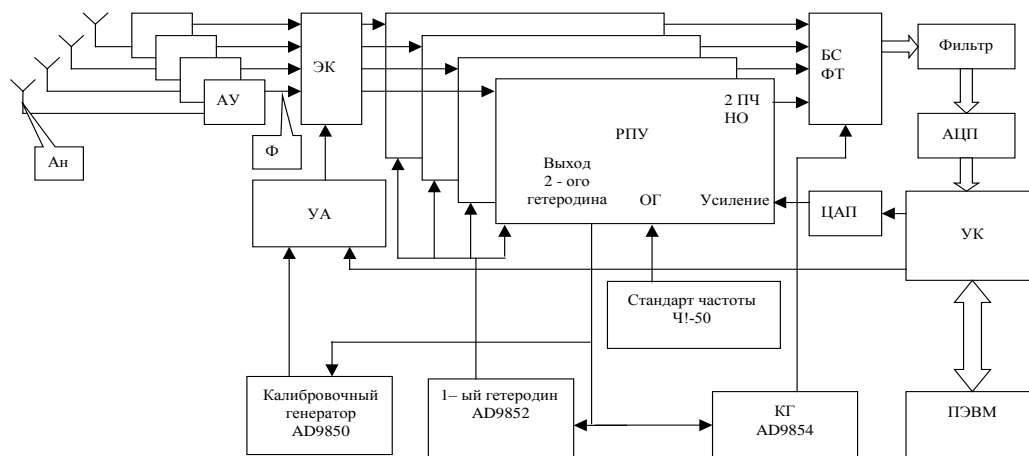


Рис. 1. Блок – схема многоканального фазоугломерного комплекса.

Антенная система комплекса состоит из четырех вертикальных вибраторов, расположенных по кругу диаметром 15.6 м. Используемая конфигурация антенной системы обеспечивает однозначное определение разности фаз для сигналов с частотой 1 - 20 МГц и произвольных углов прихода, обеспечивая возможность организации различных по ориентации и частотному диапазону радиотрасс без изменения конфигурации антенного поля. Доплеровский фазоугломерный комплекс позволяет проводить накопление данных в режиме измерения углов прихода на одной частоте или в режиме доплеровских измерений на четырех частотах параллельно. Параметры наиболее часто используемых радиотрасс приведены в таблице 1.

Использование современных средств прямого цифрового синтеза частот, позволило повысить стабильность и надежность гетеродинов и системы калибровки комплекса, обеспечивая точность установки частотных параметров до $1 \cdot 10^{-6}$ Гц при стабильности, определяемой стандартом частоты Ч1-50 ($< 1 \cdot 10^{-9}$). Использование современных средств

синтеза сигналов, аналого – цифрового преобразования и цифровой обработки сигналов позволило создать надежную систему, обеспечивающую проведение автоматизированных циклов измерений для получения длинных временных рядов, гарантирующих выделение долгопериодных вариаций исследуемых параметров.

Таблица 1. Характеристики основных используемых радиотрасс.

Трасса	Азимут трассы (град)	Длина трассы (Км)	Частоты (КГц)	Радиостанции
Москва – Казань	274.3	739	7440,9720 4996,9996	“Радио России” РВМ
Архангельск – Казань	337.6	1080.7	6160	“Радио России”
Екатеринбург – Казань	76.2	715.1	7220	“Радио России”
Краснодар – Казань	193.1	1702.7	11655	“Радио России”
Кавала – Казань	237.9	2440.4	7220	“Радио Свободы”
Лампертхайм – Казань	272.6	2785.2	7220	“Радио Свободы”

В разделе 2.2 перечислены недостатки, свойственные традиционным (полностью аналоговым) способам построения радиоприемных систем (старение элементов, температурный дрейф, сложность настройки, неидентичность каналов и др.). Особенно сильно эти недостатки сказываются на качестве работы многоканальных измерительных системах. Для обеспечения высоких точностей в измерениях требуется регулярный контроль параметров радиоприемного тракта, организация системы компенсации ошибок и параметрических дрейфов. Делается вывод о необходимости применения алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) и приводится блок-схема разработанного цифрового приемного тракта, использующего современные средства ЦОС: цифровой сигнальный процессор TMS320C6416 и шестиканальный однокристалльный 16 – разрядный аналого – цифровой преобразователь ADS8364, работающие в режиме субдискретизации (undersampling) и позволяющие производить прямой цифровой перенос спектра на второй промежуточной частоте, что упрощает приемный тракт и повышает стабильность его параметров [15].

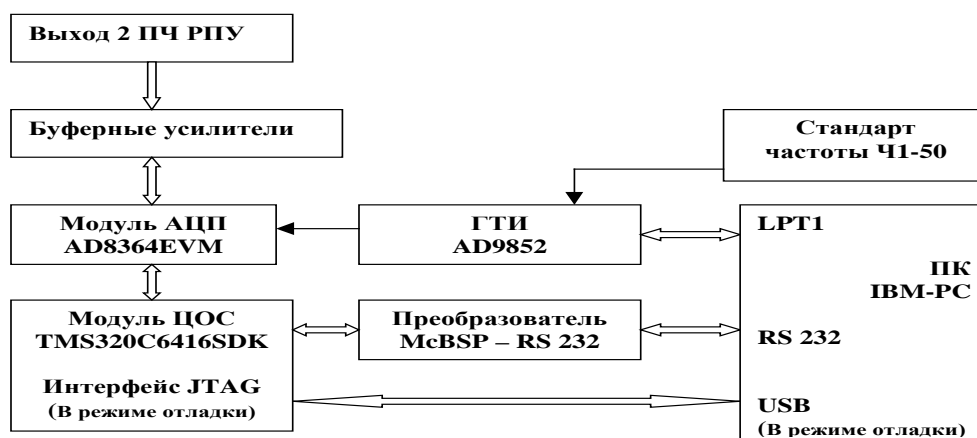


Рис. 2. Модуль цифрового приемника.

Показана возможность создания на основе описанного выше цифрового приемника измерительной системы с расширенным до 90 дБ динамическим диапазоном при проведении доплеровских измерений. Применение методов цифровой обработки сигналов позволяет расширить возможности работы с адаптивными полосами сигналов, применяя методы цифровой фильтрации. На рис. 2 представлена блок-схема цифрового приемника. На рис. 3 представлен пример результатов работы цифрового приемника, из которых

видно, что свободный динамический диапазон аналого-цифрового преобразования (SFDR) ≈ 75 дБ, а цифровой приемник позволяет производить прямой цифровой перенос спектра на низкую частоту и осуществлять цифровую фильтрацию.

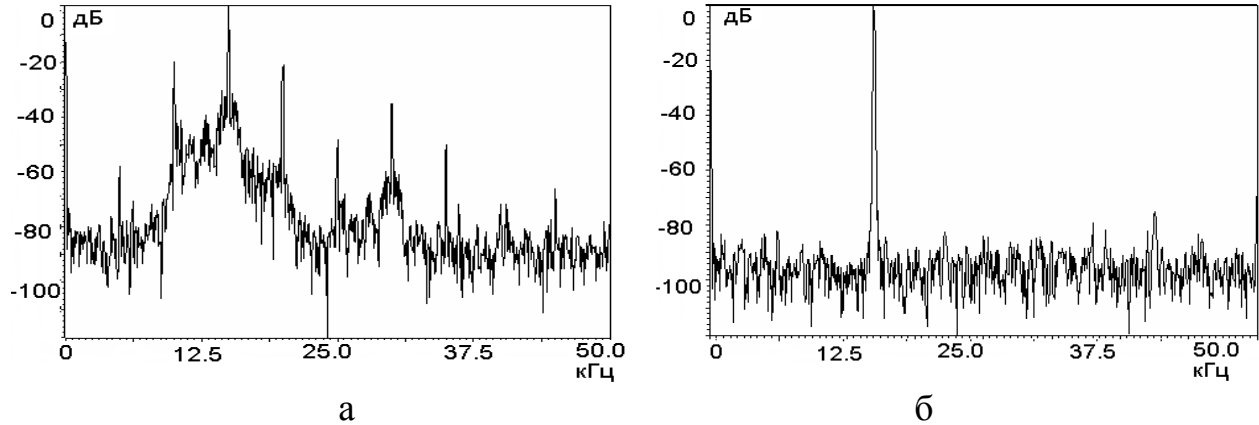


Рис. 3. Сигнал станции «Радио России» 7220 кГц г. Екатеринбург
а) до (частота 215 кГц полоса 10 кГц) и б) после фильтрации (частота 215 кГц полоса 200 Гц).

В разделе 2.3 представлены блок-схемы управляющего программного обеспечения и описаны алгоритмы управления измерительным комплексом. Общая блок-схема многозадачного программного обеспечения представлена на рис. 4. Разработанное программное обеспечение комплекса позволяет проводить выбор режимов работы и организовывать измерения как в ручном, так и автоматическом режимах. Для решения одной из главных задач, каковой является требование по обеспечению возможности проведения долговременных измерений без участия оператора, была разработана методика проведения измерений по разработанным сценариям. Сценарием является текстовый файл описания последовательности действий, времени начала и длительности их исполнения. После прочтения информации из файла управляющая программа помещает исполняемые задачи в очередь и запускает их в соответствии с показаниями системного таймера и временем начала исполнения. Такой подход позволил эффективно организовать мониторинг текущих ионосферных параметров.

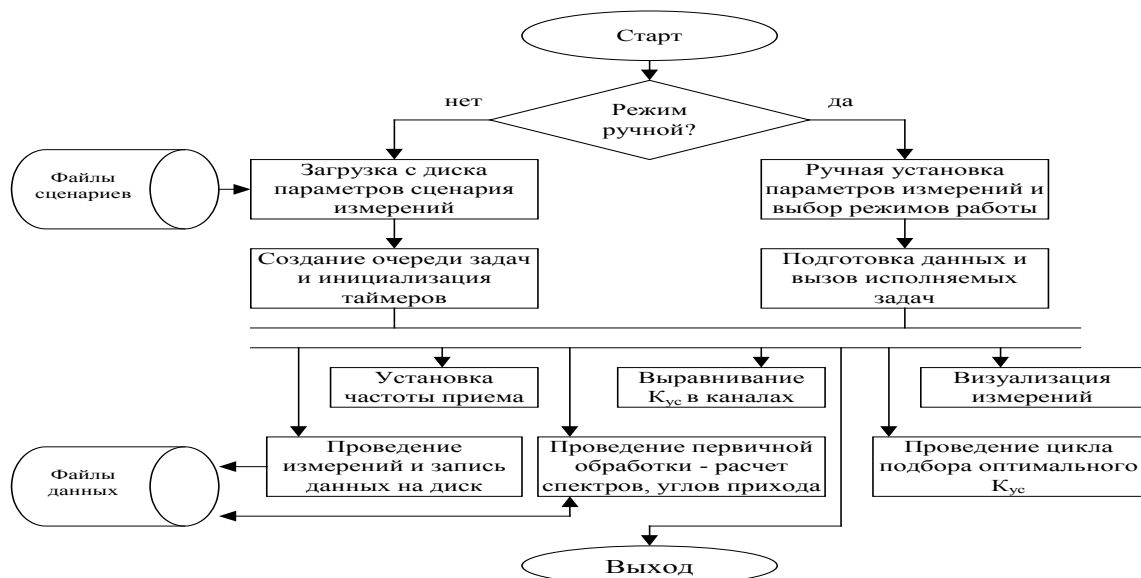


Рис. 4. Блок – схема программного обеспечения фазоугломерного комплекса.

Также приводятся блок-схемы разработанных и примененных алгоритмов устранения аппаратных погрешностей приводящих к неидентичности приемных каналов. Поскольку аналоговые тракты формирования комплексного сигнала подвержены параметрическим изменениям, связанным с изменением температуры окружающей среды, старением элементов и др. необходимо устранить ошибки вносимые неидентичностью квадратурных каналов. Неидентичность учитывается и устраняется программным способом на основе следующего алгоритма. Обозначим истинные квадратурные составляющие X, Y , а измеренные U, V и запишем связь между ними:

$$\begin{pmatrix} u(t) \\ v(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{x,x} & T_{x,y} \\ T_{y,x} & T_{y,y} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma_x \\ \gamma_y \end{pmatrix}$$

В матрице T заложена информация о коэффициентах усиления квадратурных каналов и об отличии разности фаз между ними от 90° ; γ_x, γ_y – постоянные смещения каналов. Подав с калибровочного генератора высокостабильный сигнал и проведя цикл измерения, получаем переопределенную систему линейных уравнений для определения 6 неизвестных калибровочных коэффициентов – компонент матрицы T и вектора γ , которую разрешаем методом наименьших квадратов. Для калибровки используются реализации 512-1024 точек. Калибровки фаз делаются до и после серии измерений, после чего калибровочные коэффициенты интерполируются на нужное время (матрица T интерполируется с учетом разности фаз). При интервале 10 минут между калибровками методика позволяет проводить определение разностей фаз с точностью не хуже 10^{-3} радиан или 0.05° . Примененный алгоритм цифровой автоподстройки усиления позволяет проводить настройку усиления каналов автоматически и контролировать ее с точностью 0.05%.

Углы прихода вычисляются после нахождения параметров волнового вектора в заданном частотном фильтре после решения системы уравнений

$$\varphi_i = k_x X_i + k_y Y_i + k_z Z_i + \varphi_0,$$

где $i=1..4$ (номер антенны), k_x, k_y, k_z – компоненты волнового вектора, X_i, Y_i, Z_i – координаты антенн, φ_i – фаза сигнала на соответствующей антенне, φ_0 начальная фаза.

В разделе 2.4 приводится оценка точности аппаратной погрешности в угломерных измерениях, достижимая при заданных параметрах стабильности измерительного тракта. В качестве уровня стабильности параметров измерительного тракта взяты реально измеренные параметры системы (среднеквадратичная ошибка измерения разностей фаз, обусловленная некомпенсированной неидентичностью каналов, составляет для фазоугломерного комплекса «Спектр» значение $< 0.07^\circ$).

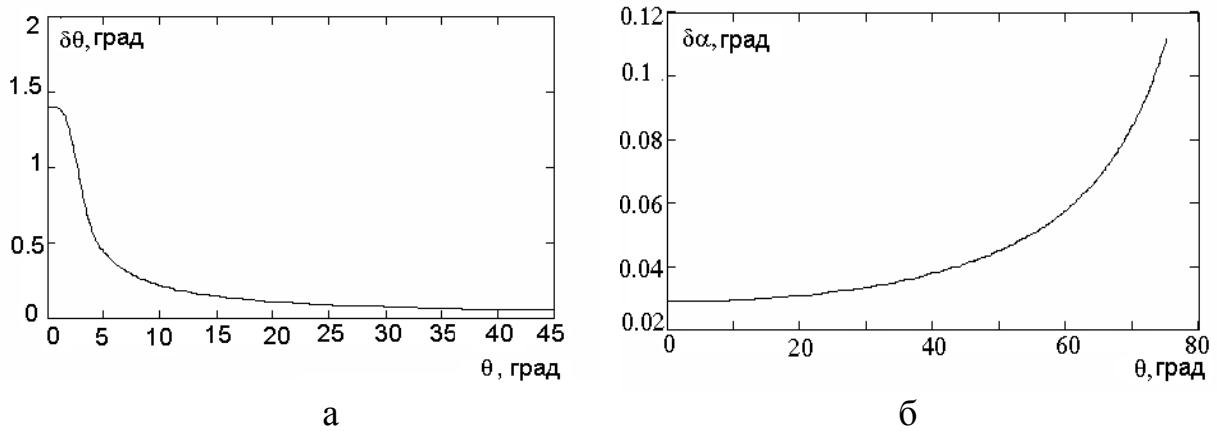


Рис. 5. Зависимость точности определения (при точности вычисления разности фаз 0.07°): а) угла места $\delta\theta$ от угла места и б) азимутального угла $\delta\alpha$ от угла места (частота $f=10$ МГц).

На примере трассы Москва – Казань показаны определяемые аппаратурной погрешностью достижимые точности определения углов прихода. В зависимости от азимута точность (при частоте 10 МГц и угле места $\theta=20^\circ$) изменяется в пределах $0.075^\circ \div 0.12^\circ$ для угла места и $0.028^\circ \div 0.034^\circ$ для азимута. Зависимость ошибок от угла места на частоте 10 МГц на трассе Москва - Казань приводится на рис. 5.

При использовании метода ЧПРП эффективное определение углов прихода радиолуча возможно, если в принимаемом радиосигнале имеются значительные составляющие, обусловленные отражением от слоев E или F. В разделе 2.4 показано, что в методе ЧПРП определяющими являются ошибки определения фаз, вызванные сложным спектральным составом и нестационарностью ионосферного сигнала. Главным ограничивающим фактором в доплеровской фильтрации является невозможность бесконечного увеличения временной апертуры из-за нестационарности параметров ионосферы. В проведенных на трассах различной конфигурации измерениях значение интервала стационарности сигнала в зависимости от условий, трассы и времени суток изменялось в пределах от 15 с до 200 с.

Таблица 2. Достигнутые точности определения углов прихода (приемный пункт Казань).

Пункт излучения	СКО ошибки определения угла места $\delta\theta$ в градусах	СКО ошибки определения азимутального угла $\delta\alpha$ в градусах
Краснодар	1.73	1.81
Москва	1.16	1.25
Архангельск	1.51	1.54
Екатеринбург	1.03	1.12

В соответствии с результатами модельных расчетов и обработки экспериментально полученных сигналов, установлено, что точность определения углов порядка $2 - 4^\circ$ для угла места и $1 - 2^\circ$ для азимутального угла является для описанной антенной системы пределом при использовании классических методов спектральной обработки. Далее рассматривается вариант применения несимметричной в горизонтальной плоскости антенной системы, позволяющей в среднем в 2 - 3 раза повысить точность измерения угла места, при незначительном ухудшении точности измерения азимутального угла.

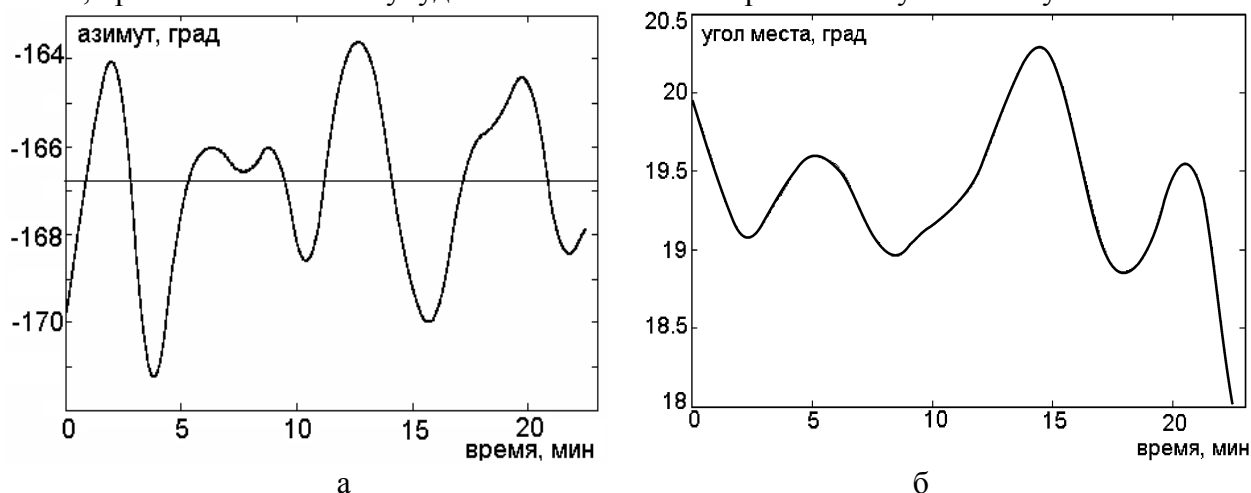


Рис. 6. Вариации углов прихода на трассе Краснодар – Казань:

а) азимутальный угол, б) угол места.

На рис. 6 представлен пример реализации, демонстрирующий результаты измерений углов прихода для трассы Краснодар–Казань (частота 11655 кГц, август 2003 г). Диапазон колебаний углов прихода согласуется с измерениями, приводимыми другими авторами [5,16,17].

В **разделе 2.5** приведены примеры, показывающие возможности фазоугломерного комплекса при работе в режиме многочастотного доплеровского зондирования. Различные реализации измерений доплеровского сдвига частоты сигналов, отраженных ионосферой, иллюстрируют возможность исследования волновых процессов различного рода, в том числе долгопериодных, на основе результатов измерений созданного доплеровского фазоугломерного комплекса.

В **разделе 2.6** сформулированы основные выводы второй главы диссертационной работы.

В **третьей главе** представлены результаты измерений интервала когерентности ионосферного сигнала, показано сходство измерительных систем в радиофизическом эксперименте и обосновывается возможность использования сигналов ядерного магнитного резонанса в качестве модельных при тестировании алгоритмов обработки сигналов, применяемых в ионосферном эксперименте [18]. В главе описывается экспериментальное оборудование и программное обеспечение созданное для решения этой задачи. Рассматривается обобщенная блок-схема установки для исследования явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и приводятся примеры блок-схем, разработанных автором и использованных в эксперименте.

В **разделе 3.1** представлены результаты измерений интервала когерентности ионосферного сигнала в различных условиях. На основе приведенных экспериментальных данных (диапазон изменения времени когерентности 15 - 200) доказываем необходимость применения методов спектрального оценивания с повышенной разрешающей способностью для расширения границ применимости метода ЧПРП. Указывается, что из-за сложностей, возникающих в ионосферном эксперименте (неповторимость условий проведения, трудность интерпретации результатов) необходимо для проверки устойчивости и повторяемости результатов при тестировании разрабатываемых методов спектрального оценивания, в дополнение к численному эксперименту, использовать еще и экспериментальные временные ряды. В качестве тестовых временных рядов предложено использовать сигналы, полученные на ЯМР установках, поскольку эти системы, как правило, являются приборами, регистрирующими сигналы, частотный спектр которых расположен в КВ-диапазоне и имеют сходные динамические и статистические параметры приемного тракта. Методика обработки ЯМР-сигналов также основана на спектральном анализе. При этом результаты, полученные в ЯМР эксперименте, повторяемы и хорошо предсказуемы, при условии использования образцов с известными характеристиками.

В **разделе 3.2** рассматривается использование спектрометра высокого разрешения Tesla BS – 587 (частота протонного резонанса 80 МГц), который был доведен до уровня, отвечающего требованиям современного эксперимента. Проведенные доработки позволили временные ряды, получаемые с его помощью, использовать при тестировании алгоритмов спектрального оценивания.

В **разделах 3.3 – 3.6** приводятся блок – схемы разработанных автором и примененных в эксперименте систем управления. Показано, что применение современной микропроцессорной техники позволяет существенно уменьшить габариты и расширить возможности измерительных систем. Так, разработанный малогабаритный одноплатный генератор импульсных последовательностей позволяет формировать управляющие шаги с точностью 1 мкс, аналого – цифровое преобразование с разрядностью до 16 и полосой

обзора до 300 кГц и организовывать накопление до 30000 точек, а разработанный микропроцессорный терморегулятор использует пропорционально интегрально дифференциальный закон (ПИД) регулирования мощности и позволяет в 3–5 раз уменьшить время выхода термостабилизатора на рабочий режим. Применение современных средств синтеза частот позволяет повысить качество и надежность опорного синтезатора частот системы [19, 20, 21]. Описано программное обеспечение, позволяющее проводить ЯМР эксперименты в различных режимах.

В **разделе 3.7** рассматривается возможность применения в эксперименте готовых систем сбора данных, имеющих в своем составе цифровой сигнальный процессор. Подобная идеология позволит удешевить системы управления радиофизическим экспериментом, совмещая в одном функционально законченном модуле и свойства системы управления и систему цифровой обработки сигналов с высокой стабильностью параметров. Использование сигнального процессора позволило получить систему формирования управляющих импульсных последовательностей со следующими характеристиками: минимальная продолжительность импульса – 1 мкс; дискретность установки временного положения импульсов – 30 нсек; стабильность положения временных меток ($\Delta t/t$) – 10^{-6} ; полоса частот, обрабатываемая цифровым приемником, при использовании платы сбора данных L761 ограничена быстродействием АЦП (125 кГц).

В **разделе 3.8** сформулированы выводы из третьей главы диссертационной работы.

В **четвертой главе** представлен краткий обзор методов идентификации систем, показано отличие параметрических и непараметрических методов спектрального оценивания и обосновывается необходимость использования в ряде радиофизических экспериментов новых методов спектрального оценивания для обработки данных, позволяющих повысить спектральное разрешение и ослабить традиционное для классических методов ограничение $(1/T)$ [8]. В качестве применяемого метода, на основе сравнительного анализа, выбирается метод разложения по функциям с гибкой структурой (ФГС) [22], приводится описание используемого алгоритма и примеры реализаций.

В **разделе 4.1** Рассмотрена структура методов спектрального оценивания применяемых в задачах идентификации систем, базирующихся на общем представлении квазидетерминированной модели:

$$A(q) y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t),$$

где $u(t)$ – детерминированное, а $e(t)$ – стохастическое воздействие. Рассматриваются наиболее часто применяемые варианты, использующие различные комбинации полиномов множителей A, B, C, D, F [8] и делается вывод о возможности применения методов Прони и ФГС к сигналам, искаженным ионосферой, как априорно хорошо их описывающие квазидетерминированной моделью.

В **разделе 4.2** рассматриваются основные положения, на которых базируется метод спектрального оценивания на основе разложения по функциям с гибкой структурой (метод ФГС).

В основе рассматриваемого метода лежит модельное предположение, что исследуемый сигнал удовлетворяет некоторому линейному обыкновенному дифференциальному уравнению. Такое предположение является достаточно реалистичным для широкого класса физических процессов, в том числе нестационарных. Сигнал такого типа вблизи некоторой точки x_0 может быть приближен решением "базисного" линейного обыкновенного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами:

$$y^{(r)} + a_1 \cdot y^{(r-1)} + \dots + a_r \cdot y = 0$$

Связь между сигналом и его приближенным представлением описывается с помощью предложенной Н.К. Куликовым обобщенной формулы представления функции одного аргумента (функции с гибкой структурой) [22]:

$$y(x) = y(x_0) + \sum_{j=1}^r y^{(j)}(x_0) \cdot \frac{\delta_j(x-x_0)}{D} + R(x), \quad (1)$$

$$R(x) = \int_{x_0}^x \int_{x_0}^t \eta(\tau) \cdot \frac{\Delta_n(t-\tau)}{D} d\tau dt,$$

где

$$\delta_j(\xi) = \det \begin{pmatrix} 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \lambda_r \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{j-1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \lambda_r^{j-1} \\ \varphi_1(\xi) & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \varphi_r(\xi) \\ \lambda_1^j & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \lambda_r^j \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{r-1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \lambda_r^{r-1} \end{pmatrix},$$

$$\Delta_n(\xi) = \det \begin{pmatrix} 1 & \dots & \dots & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \dots & \dots & \dots & \lambda_r \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{r-1} & \dots & \dots & \dots & \lambda_r^{r-1} \\ \exp(\lambda_1 \cdot \xi) & \dots & \dots & \dots & \exp(\lambda_r \cdot \xi) \end{pmatrix}, \quad D = \det \begin{pmatrix} 1 & \dots & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \dots & \dots & \lambda_r \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{r-1} & \dots & \dots & \lambda_r^{r-1} \end{pmatrix},$$

λ_i - корни базисного уравнения $\lambda^r + a_1 \cdot \lambda^{r-1} + \dots + a_r \cdot \lambda = 0$,

$$\varphi_i(\xi) = \frac{\exp(\lambda_i \cdot \xi) - 1}{\lambda_i},$$

а функция $\eta(t)$ определяется выражением

$$\eta(t) = y^{(r+1)} + a_1 \cdot y^{(r)} + \dots + a_r \cdot y'.$$

Для выбора оптимальных значений параметров базисного уравнения используется следующий прием: обе части уравнения интегрируются r раз, в результате чего получаем выражение (2)

$$y + a_1 \cdot \hat{I}_{x_0} y + \dots + a_r \cdot \hat{I}_{x_0}^r y = C_0 + C_1 \cdot (x - x_0) + \dots + C_{r-1} \cdot (x - x_0)^{r-1} \quad (2)$$

Для сигнала, представляющего собой сумму синусоид, параметрами a_i определяются частоты гармоник, а по C_i находятся соответствующие амплитуды. Записывая это выражение в каждой точке, получаем для a_i , C_i переопределенную систему линейных уравнений, которая решается методом наименьших квадратов. Таким образом, получается модельное представление и аппроксимация сигнала. По известной модели спектральная плотность мощности находится так же, как и для метода Прони. Используемая процедура имеет следующие существенные преимущества по сравнению с процедурой Прони.

1. Гибкость основной аппроксимационной формулы. Данная аппроксимация включает в себя как частные случаи (при соответствующем выборе коэффициентов базисного

- уравнения) ряд Фурье, полигармоническую и полиномиальную аппроксимации, а также их комбинации.
2. Меньшую относительную погрешность коэффициентов системы уравнений, поскольку в выражении стоят интегралы от исходного ряда, то есть производится предварительное сглаживание.
 3. Гибкость вычислительной схемы. Возможно применение различных квадратурных формул в зависимости от особенностей конкретной задачи, использование промежуточной аппроксимации другого порядка и т.п. В частности, в отличие от метода Прони и большинства других параметрических методов имеется возможность применения для рядов данных с пропусками.
 4. Более простой учет априорной информации об исследуемом сигнале, поскольку амплитуды и частоты определяются из одной системы уравнений.

Известно [8, 10], что результаты работы ПМСО сильно зависят от многих факторов (выбор порядка модели, способ интегрирования и выбор опорной точки интегрирования в случае использования ФГС, отношение сигнал/шум и др.). Выбор оптимальных условий и методов решения для метода ФГС первоначально отрабатывался на модельных рядах и сигналах ЯМР.

В разделе 4.3 проводится сравнение возможностей методов спектрального оценивания при различных характеристиках входного сигнала.

Таблица 3. Модельные расчеты эффективности методов спектрального оценивания.

	Модифицированный ковариационный метод	Метод Прони	Метод ФГС
Процент выделения компонент в 2-х компонентных реализациях (%)	57	49	71
Воспроизводимость результата для 2-х компонентных реализаций (%)	65	66	84
Процент выделения компонент в 3-х компонентных реализациях (%)	6	5	22
Воспроизводимость результата для 3-х компонентных реализаций (%)	39	37	73

В таблице 3 представлены результаты модельных расчетов по воспроизводимости и возможности выделения компонент сигналов для различных методов.

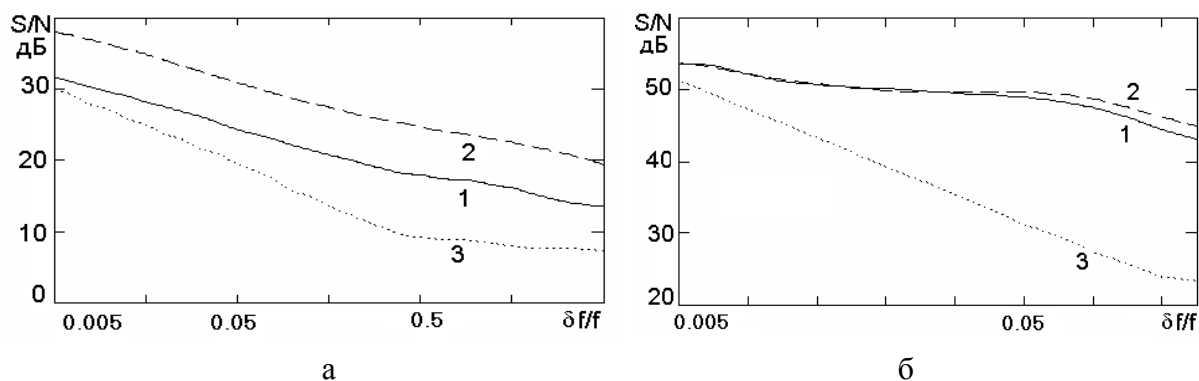


Рис.7. Зависимость порогового значения отношения сигнал/шум (в дБ), при котором обеспечивается надежное (с вероятностью 0.9) разделение всех компонент от относительной разности частот (в логарифмическом масштабе):
а) 2-х компонентный и б) 3-х компонентный модельный сигнал.
1 - метод Прони, 2 - авторегрессионный метод, 3 - метод ФГС.

Из таблицы 3 видно, что метод ФГС существенно превосходит методы Прони и модифицированный ковариационный, в особенности при обработке сигналов со сложным спектральным составом и плохим отношением сигнал/шум.

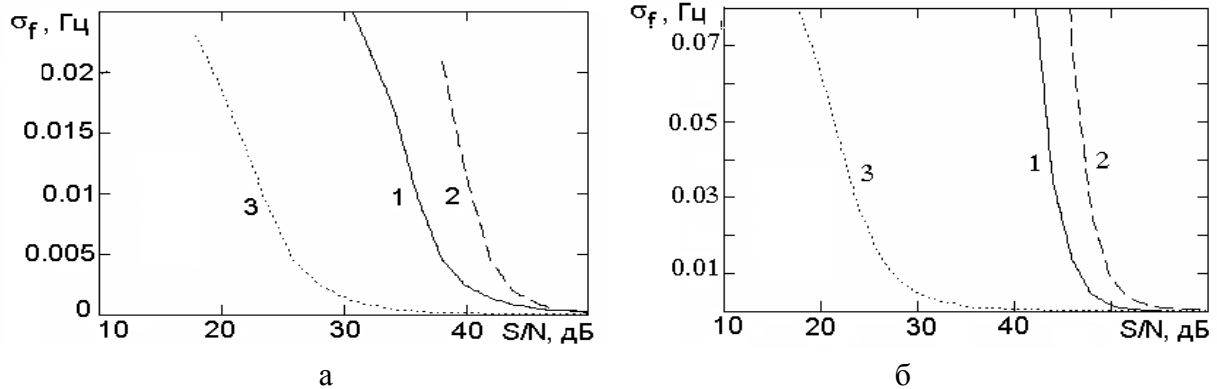


Рис. 8. Зависимость СКО оценки частот составляющих от отношения сигнал/шум
а) 2-х и б) 3-х компонентные модельные сигналы.

1 - метод Прони, 2 - авторегрессионный метод, 3 - метод ФГС.

На рис. 7 показано отношение сигнал/шум (S/N), при котором обеспечивается заданное улучшение характеристик по разрешению спектральных компонент сигнала (отношение $\delta f/f$ показывает отношение разности частот составляющих модельного спектра δf к классическому спектральному разрешению f). На рис. 8 показаны модельные расчеты точности определения частот спектральных компонент для сравниваемых методов при различном соотношении сигнал/шум.

В разделе 4.5 представлены результаты применения разработанного метода к реальным сигналам.

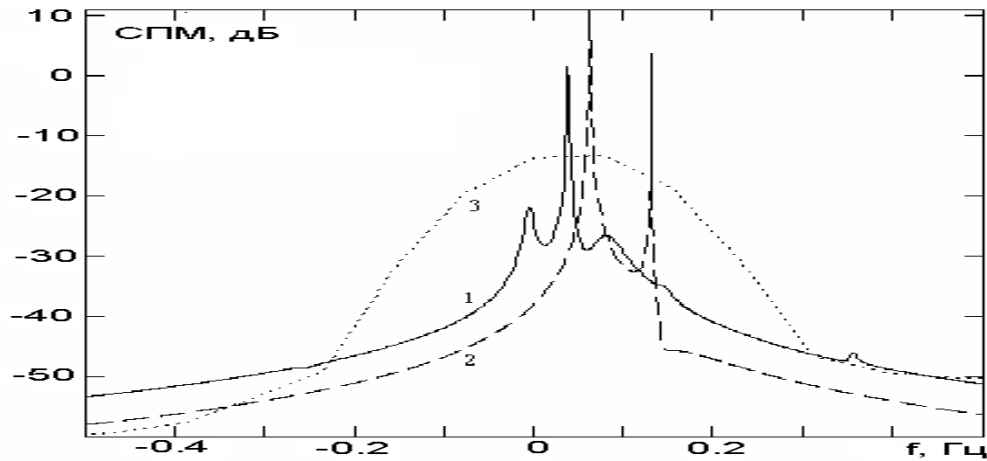


Рис. 9. Оценки спектральной плотности для серии реализаций ионосферного сигнала:
1 - метод ФГС, 2 - метод Прони, 3 - метод Бартлетта.

Из рис. 9 видно, что метод ФГС превосходит по возможностям разделения компонент сложного сигнала, при обработке дневных данных, когда рабочая частота меньше максимально применимой частоты ($f_{\text{изл}} < \text{МПЧ}$). Длина использованной в эксперименте когерентной реализации составляла 256 точек, что обеспечивает разрешающую способность 0.078 Гц при использовании классических методов Фурье-спектроскопии. Метод ФГС позволил установить сложную структуру спектрального максимума, не разрешаемую другими методами. Оптимальный порядок модели оказался равным 7. Четыре максимума обнаруживались на 7 из 8 реализаций в серии при их раздельной обработке, что позволяет в данном случае утверждать, что эта структура

отражает некоторый физический процесс, а не является следствием ошибки метода обработки. На рис. 9 представлены сравнительные результаты применения методов спектрального оценивания к ионосферным сигналам.

В разделе 4.6 сформулированы основные выводы четвертой главы диссертационной работы.

В **Заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В **Приложении** представлены описания схемы электрической принципиальной программатора импульсных последовательностей и управляющей программы микроконтроллера.

Основные результаты работы

1. Создан многоканальный автоматизированный доплеровский фазоугломерный комплекс дистанционного мониторинга ионосферы. В составе комплекса применена антенная система с малой базой (размер антенного поля $< \lambda$). Для повышения точности измерений угла места предложена несимметричная в горизонтальной плоскости антенная система, что позволило в 2 - 4 раза повысить точность измерения угла места при незначительном (порядка 10%) ухудшении точности в определении азимутального угла. Создан многоканальный цифровой приемник на базе цифрового сигнального процессора, применение которого позволило расширить динамический диапазон измерений до 80 дБ.
2. Получены количественные оценки точностных параметров измерительного комплекса дистанционного зондирования ионосферы. В настоящее время аппаратная погрешность измерительного тракта комплекса, ограничивающая точность измерения углов прихода, имеет порядок $0.075^\circ \div 0.12^\circ$ для угла места и $0.028^\circ \div 0.034^\circ$ для азимута при параметрах распространения, характерных для трассы Москва – Казань. Это существенно меньше ошибок, вызываемых нестационарностью ионосферы и сложным спектральным составом сигналов. Общая ошибка оценивается величинами 1 – 2 ° в зависимости от характеристик радиотрассы.
3. Разработаны методики и алгоритмы проведения долговременных автоматизированных измерений и проведено несколько длительных измерительных циклов на трассах различной ориентации, протяженности и для различных сезонных условий. Набран значительный объем данных, позволивший оценить частотно-фазовые характеристики ионосферных сигналов.
4. Разработаны и внедрены системы управления ионосферным экспериментом и исследования вещества методом ядерного магнитного резонанса, позволившие организовать современные системы сбора и накопления данных. Полученные временные ряды использовались для тестирования разработанных методов спектрального оценивания.
5. Впервые параметрический метод спектрального оценивания на основе разложения по функциям с гибкой структурой применен к ионосферным сигналам. Метод продемонстрировал высокий уровень устойчивости к шуму при выделении составляющих из сложных (многокомпонентных) сигналов. Метод позволил выделить две близкорасположенные компоненты (ближе 1/T) в 71% случаев при воспроизводимости 84% и для 3-х компонент в 22% случаев при воспроизводимости 73%. Алгоритм протестирован на различных рядах модельных и реальных экспериментальных данных.
6. Проведен сравнительный анализ методов спектрального оценивания в применении к ионосферным сигналам и выявлено существенное превосходство разработанного

метода разложения по функциям с гибкой структурой над широко известными методами Прони и модифицированным ковариационным для реализаций, полученных в дневное время, когда $f_{\text{изл}} < \text{МПЧ}$ и сигнал соответствует квазидетерминированной модели. Выявлено, что в противном случае, как правило, для ночных реализаций, лучше применять авторегрессионные методы или метод ФГС с оценкой по автокорреляционной последовательности.

Основные публикации автора по теме диссертационной работы

1. Теплов, В. Ю. Оценка спектра размеров неоднородностей нижней ионосферы по данным наклонного зондирования / В. В. Бочкарев, М. М. Кацевман, А. Н. Плеухов, В. Ю. Теплов // Геомагнетизм и аэрономия. - 1998, - т. 28, № 3, - С.169-173.
2. Теплов, В. Ю. Спектральная обработка сигналов наклонного зондирования ионосферы с помощью параметрических методов /А. Н. Плеухов, В. В. Бочкарев, М. М. Кацевман, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов //Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2000. - Т.XLIII, № 7. - С.607-616.
Teplov, V. Yu. Spectral processing of oblique ionospheric sounding signals using parametric methods / A. N. Pleukhov, V. V. Bochkarev, M. M. Katsevman, I. R. Petrova, V. U. Teplov // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2000. - Vol.43, №7, - P.548-556.
3. Теплов, В. Ю. Экспериментальное исследование нестационарности сигнала наклонного зондирования ионосферы на среднеширотной коротковолновой радиотрассе / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2004. - Т.XLVII, №8. - С.619-629.
Teplov, V. Yu. Experimental study of the nonstationarity of an oblique ionospheric sounding signal on a mid-latitude HF radiopath/ V. V. Bochkarev, I. R. Petrova, V. U. Teplov // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2004. - Vol.47, №8, - P.552-560.
4. Теплов, В. Ю. Эффекты магнитной бури 29 – 31 октября 2003 г. на среднеширотной КВ – радиотрассе (по данным доплеровских измерений) / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Космические исследования. – 2004. – Т.42, №6 - С.640-644
5. Теплов, В. Ю. Исследование ионосферы фазовым методом / В. Ю. Теплов, В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. О. Шорников; Казанский Гос. Ун. – Казань, 2002. - - 12 с. – Деп. В ВИНТИ 18.01.02, №87.
6. Teplov, V. Yu. Digital multichannel complex for the monitoring of the ionosphere /V. V. Bochkarev, R. R. Latypov, I. R. Petrova, V. Yu. Teplov // SPIE Proc. - 2004. - Vol. 5743. - P.532-538.
7. Teplov, V. Yu. Research of wave processes in thermosphere by oblique sounding method / V. V. Bochkarev, R. R. Latypov, I. R. Petrova, V. Yu. Teplov // SPIE Proc. - 2004. - Vol. 5743. - P.562-569.
8. Теплов, В.Ю. Управление спектрометров высокого разрешения TESLA-BS587 РС-совместимым компьютером / Д. Ш. Идиятуллин, З. Ш. Идиятуллин, Б. З. Идиятуллин, В. Ю. Теплов // ПТЭ. – 1998. - №1. – С.82-85.
Teplov, V. Yu. High-Resolution NMR Spectrometer Tesla BS-587 Controlled by an IBM/PC Compatible Personal Computer /Idiytullin D. Sh., Idiytullin Z. Sh., Idiytullin B. Z., Teplov V. U. // Instruments and Experimental Techniques. – 1998. Vol. 41, №1, - P.72-74.
9. Теплов, В. Ю. Система термостатирования на однокристалльной микроэвм и термомодулях Пельтье /В. Ю. Теплов, А. В. Анисимов // ПТЭ. – 2002. – N3. - С. 128-130.
Teplov, V. Yu. System of Thermostatic Control with mikrokontroller and Pelthier thermopiles / V. Yu. Teplov, A. V. Anisimov // Instruments and Experimental Techniques. – 2002. Vol.45, №1.

10. Теплов, В. Ю. Микропроцессорный программатор импульсных последовательностей для ЯМР - релаксометра – диффузомера / В. Ю. Теплов, В. И. Романов, А. В. Анисимов, А. В. Романов // ПТЭ. – 2002. - №6. – С.45–51.
 Teplov, V. Yu. Microprocessor programmer pulse sequences for a NMR Relaxometer / V. Yu. Teplov, B. A. Romanov, A.V. Anisimov, A. V. Romanov // Instruments and Experimental Techniques. – 2002. - Vol.45, №6. – P.770-775.
11. Teplov, V. Yu. System of Thermostatic Control on Pelthier Thermopiles and Microprocessor Control for a Portable NMR Relaxometer / A. V. Anisimov, V. Yu. Teplov, N. I. Silkin // Journal of Magnetic Resonance. – 2002. – Vol. 154. – P.176-180.
12. Теплов, В. Ю. Исследование волновых процессов в термосфере методом наклонного зондирования / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов, О. Н. Шерстюков // Электронный журнал "Исследовано в России". – 2004. - №7.- С.64-75 – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/007.pdf>, свободный.
13. Теплов, В. Ю. Параметрическая спектральная обработка нестационарных сигналов с помощью непрерывного всплеск - преобразования / В. В. Бочкарев, М. М. Кацевман, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Прием и обработка сигналов в сложных информационных системах. / Казанский ун-т. – 2001. - №20. – С.44-48. – ISBN 5-7464-0737-2.
14. Теплов, В. Ю. Многоканальный измерительный фазо-угломерный комплекс КВ - диапазона. / В. Ю. Теплов, В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. О. Шорников // Прием и обработка сигналов в сложных информационных системах. / Казанский ун-т. – 2003. - №21. С.113-121. – ISBN 5-7464-0832-8.
15. Теплов, В. Ю. Современный синтезатор передающего модуля станции вертикального зондирования ионосферы / Е. В. Березовский, А. Д. Акчурин, В. Ю. Теплов // Прием и обработка сигналов в сложных информационных системах. / Казанский ун-т. – 2003. - №21. – С.142-148. - ISBN 5-7464-0832-8.
16. Теплов, В. Ю. Алгоритмы определения параметров релаксации, диффузии и потоков методом ЯМР. / В. Ю. Теплов, В. В. Бочкарев // Структура и динамика молекулярных систем. – Казань, - 1998. Т. 2. – С.28-32. – ISBN 5-8158-0009-0.
17. Теплов, В. Ю. Использование непрерывного всплеск-преобразования для параметрической спектральной обработки нестационарных сигналов / В. В. Бочкарев, М. М. Кацевман, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Цифровая обработка сигналов и ее применение: доклады 3-ей Междунар. конф., Москва, Россия, 29 нояб. – 1 дек. 2000. - М., 2000. - Т.1. – С.172-175.
 Teplov, V. Yu. Usage of continuous wavelet-transformation for parametric spectral processing of non-steady signals / Bochkarev V. V., Katsevman M. M., Petrova I. R., Teplov V. Yu. // Digital signal processing and its applications: Proceedings International conference and exhibition, Moscow, Russia, 29 nov. – 1 dec. 2000. – М., 2000. – Vol. 1. – P.175-176.
18. Теплов, В. Ю. Фазо-угломерные исследования параметров сигналов в КВ-диапазоне / В. Ю. Теплов, В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, А. А. Сонгатова, В. О. Шорников // Школа-конференция по дифракции и распространению волн: труды XI Всероссийской конф. – Москва, Россия 19 – 23 дек. 2001. – М., 2001. - Т.2. – С.329-331.
19. Применение современных информационных технологий при создании автоматизированной системы мониторинга ионосферы в КВ-диапазоне / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, А. А. Сонгатова, В. Ю. Теплов // LVII Научная сессия посвященная дню радио: труды конф. – Москва, Россия, 15 –16 мая 2002. – М., 2002. – Т.1.- С.247-250
20. Теплов, В. Ю. Обнаружение ВГВ в нижней термосфере по вариациям углов прихода и доплеровских сдвигов частоты сигнала наклонного зондирования / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // XX Всероссийская конференция по РРВ: труды конф. - Нижний Новгород, Россия, 2 – 4 июля 2002. – Нижний Новгород, 2002. - С.295-296

21. Теплов, В. Ю. Многоканальные фазовые измерения в КВ-диапазоне / В. Ю. Теплов, В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. О. Шорников, В. С. Бухмин // XX Всероссийская конференция по РРВ: труды конф. - Нижний Новгород, Россия, 2 – 4 июля 2002. – Нижний Новгород, 2002. - С.298-299
22. Теплов, В. Ю. Влияние интервала стационарности ионосферного радиосигнала на угломерные измерения в системе с малой базой / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // XX Всероссийская конференция по РРВ: труды конф. - Нижний Новгород, Россия, 2 – 4 июля 2002. – Нижний Новгород, 2002. - С.296-297
23. Теплов, В. Ю. Адаптивное параметрическое спектральное оценивание нестационарных сигналов / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Цифровая обработка сигналов и ее применение: доклады 5 - ой Междунар. конф., Москва, Россия, 12 - 14 марта 2003. - М., 2003. - Т.1. – С.97-99.
Teplov, V. Adaptive parametrical spectral estimation of non-stationary signals / Bochkarev V., Petrova I., Teplov V. // Digital signal processing and its applications: Proceedings 5th International conference and exhibition, Moscow, Russia, 12 -14 march. 2003. – М., 2003. – Vol. 1. – P.99-100.
24. Теплов, В. Ю. Использование сигнального процессора ADSP-2184 в системе управления экспериментом ядерного магнитного резонанса / В. Ю. Теплов, О. Ф. Айзатуллин, В. В. Бочкарев // Цифровая обработка сигналов и ее применение: доклады 5 - ой Междунар. конф., Москва, Россия, 12 – 14 марта 2003. - М., 2003. - Т.2. – С.558-561.
Teplov, V. Using digital signal processor ADSP-2184 in nuclear magnetic resonance control system / Teplov V, Ayzatuln O., Bochkarev V. // Digital signal processing and its applications: Proceedings 5th International conference and exhibition, Moscow, Russia, 12 - 14 march. 2003. – М., 2003. – Vol. 2. – P.561-562.
25. Теплов, В. Ю. Использование современных средств прямого цифрового синтеза сигналов в многоканальном измерительном комплексе КВ-диапазона. / В. В. Бочкарев, Р.Р. Латыпов, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов, В. О. Шорников // Излучение и рассеяние ЭМВ: труды междунар. конф., Таганрог, Россия, 16 – 20 июнь 2003. - Таганрог, 2003 – С.308-311
26. Теплов, В. Ю. Анализ нестационарности сигнала наклонного зондирования ионосферы. / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Излучение и рассеяние ЭМВ: труды междунар. конф., Таганрог, Россия, 16 – 20 июнь 2003. - Таганрог, 2003 – С.256-268
27. Теплов, В. Ю. Анализ периодических возмущений в нижней термосфере по вариациям параметров сигнала наклонного зондирования. / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Излучение и рассеяние ЭМВ: труды междунар. конф., Таганрог, Россия, 16 – 20 июнь 2003. - Таганрог, 2003 – С.252-255
28. Теплов, В. Ю. Параметры волновых движений в нижней ионосфере по наблюдениям на доплеровском фазо-угломерном комплексе Казанского Гос. Университета / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Байкальская школа по фундаментальной физике: доклады, Иркутск, Россия, 15-20 сент. 2003. - Иркутск, 2003г - С.52-54
29. Теплов, В. Ю. Учет нестационарности ионосферного сигнала в задачах пеленгации. / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Байкальская школа по фундаментальной физике: доклады, Иркутск, Россия, 15-20 сент. 2003. - Иркутск, 2003г - С.101-102
30. Теплов, В. Ю. Стабильность фазовых характеристик сигнала наклонного зондирования ионосферы / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Байкальская школа по фундаментальной физике: доклады, Иркутск, Россия, 15-20 сент. 2003. - Иркутск, 2003г - С.108-109

31. Теплов, В. Ю. Использование сигнального процессора TMS320C6711 в многоканальных фазовых измерениях / В. Ю. Теплов, В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова // Байкальская школа по фундаментальной физике: доклады, Иркутск, Россия, 15-20 сент. 2003. - Иркутск, 2003г - С.106-107
32. Teplov, V. Yu. Distribution of amplitude and phase fluctuations in tilt ionospheric sounding signals / Petrova I. R., Bochkarev V. V., Teplov V. Yu. // Microwave and telecommunication technology: Proceedings of the 14th international conf., Sevastopol, Ukraine, 13 – 17 sept. 2004. – Sevastopol, 2004 – P.773-774
33. Teplov, V. Yu. Small –base location system for narrowband SW – sources / Teplov V. Yu., Bochkarev V. V. , Petrova I. R.. // Microwave and telecommunication technology: Proceedings of the 14th international conf., Sevastopol, Ukraine, 13 – 17 sept. 2004. – Sevastopol, 2004 – P.775-776
34. Teplov, V. Yu. Research of wave processes in lower thermosphere with use of measurements on middle-latitude radio lines of various orientations / V. V. Bochkarev, I. R. Petrova, V. Yu. Teplov // Problems of geocosmos: Proceedings of the 5 th International Conference, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia. 24–28 May, 2004. - St. Petersburg, 2004 - P.343 – 346
35. Teplov, V. Yu. DSP system in the Doppler phase goniometric complex / V. Yu. Teplov, V. V. Bochkarev, I. R. Petrova, // Problems of geocosmos: Proceedings of the 5 th International Conference, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia. 24–28 May, 2004. - St. Petersburg, 2004 - P.339 – 342
36. Теплов, В. Ю. Применение цифрового ЛЧМ-ионозонда в многоканальном комплексе наклонного зондирования ионосферы Казанского государственного университета / В. В. Бочкарев, Р. Р. Латыпов, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Байкальская школа по фундаментальной физике: // Байкальская школа по фундаментальной физике: доклады, Иркутск, Россия, 13-17 сент. 2004. - Иркутск, 2004г - С.91-93
37. Теплов, В. Ю. Особенности волновых процессов в верхней атмосфере Земли во время магнитных возмущений, вызванных солнечной вспышкой / В. В. Бочкарев, Р. Р. Латыпов, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Байкальская школа по фундаментальной физике: // Байкальская школа по фундаментальной физике: доклады, Иркутск, Россия, 13-17 сент. 2004. - Иркутск, 2004г - С.195-197.
38. Теплов, В.Ю. Оценка частотных спектров многомодового распространения в КВ-диапазоне / Бойков В.И., Кацевман М.М., Плеухов А.Н., Теплов В.Ю. // 16 Всесоюз. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл., Харьков, СССР, октябрь, 1990 г. – Харьков, 1990 г. – С.220.
39. Теплов, В. Ю. Модель доплеровских искажений сигналов в КВ-диапазоне / Бойков В. И., Кацевман М. М., Плеухов А. Н., Теплов В. Ю. // 17 Всесоюз. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл., Ульяновск, СССР, июнь 1993 г. – Ульяновск, 1993г. – С.39.
40. Теплов, В. Ю. Исследование нестационарных процессов в ионосфере Земли, приводящих к доплеровским искажениям радиосигналов / Бойков В. И., Кацевман М. М., Плеухов А. Н., Теплов В. Ю. // 17 Всесоюз. конф. по распространению радиоволн, Тезисы докладов, Ульяновск, СССР, июнь, 1993 г. – Ульяновск, 1993г. – С.37.

Список литературы

1. Девис, К. Радиоволны в ионосфере / Девис К. - М.: Мир, 1973. - 501 с.
2. Гинзбург, В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / Гинзбург В. Л. - М.: Наука. - 1967. - 684с.
3. Ерухимов, Л. М. Ионосфера Земли как плазменная лаборатория / Л. М. Ерухимов, С. В. Генкин // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1992. – Т35, №11/12 – С.363-387.
4. Намазов, С. А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении

- декаметровых радиоволн (обзор) / С. А. Намазов, В. Д. Новиков, И. А. Хмельницкий // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1975. – Т. XVIII, № 4. – С. 473-500.
5. Афраймович, Э. Л. Поиски предвестников землетрясений в вариациях полного электронного содержания в ионосфере по данным глобальной сети GPS / Э. И. Астафьева, Э. Л. Афраймович, А. В. Плотников // XX Всероссийская конференция по РРВ: труды конф. - Нижний Новгород, Россия, 2 – 4 июля 2002. – Нижний Новгород, 2002. – С. 90-91
 6. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере / Отв. Ред. В. Д. Гусев. - Кишнев: Штиинца, 1991. - 287с. – ISBN 5-376-00647-6.
 7. Афраймович, Э. Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы / Афраймович Э. Л. - М.: Наука, 1982. - 198 с.
 8. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория пользователя / Льюнг Л. - М.: Наука, 1991 - 432 с. – ISBN 5-02-014511-4.
 9. Основы моделирования сложных систем / Отв. Ред. И.В. Кузьмин. – Киев: Вища школа, 1981. – 361 с.
 10. Марпл, С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. / Марпл С. Л. - М.: Мир, 1990. - 584 с. – ISBN 5-03-001191-9.
 11. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов. / Рабинер Л., Гоулд Б. - М.: Мир, 1978. - 848 с.
 12. Эрнст, Р. ЯМР в одном и двух измерениях / Р. Эрнст, Дж. Боденхаузен, А. Вокаун - М: Мир, 1990. – 711 с. – ISBN 5-03-001394-6.
 13. Побережский, Е.С., Цифровые радиоприемные устройства / Побережский Е. С. - М.: Радио и связь, 1987. – 184 с.
 14. Цифровые радиоприемные системы / Отв. Ред. М. И. Жодзишский – М.: Радио и связь, 1990. – 208 с. – ISBN 5-256-00671-1.
 15. Солонина, А. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов / А. Солонина, Д. Улахович, Л. Яковлев - С-Пб: BHV – Петербург, 2001, - 464 с. – ISBN 5-94157-065-1.
 16. Хоружий, О. С. Оценка угловых характеристик декаметровых волн методом наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы / О. С. Хоружий // X Всероссийская научная конференция молодых ученых: тезисы докладов, Москва, Россия, 1-7 апр 2004 – Екатеринбург – Красноярск, изд. АСФ, 2004 – С. 984-986.
 17. Копытов, В.В. Оценка точности измерения углов прихода волны в декаметровом диапазоне волн / В. В. Копытов, О. Г. Пикалов // Журнал радиоэлектроники. – 2001. - №12 – С.1-10.
 18. Чижик, В. И. Ядерная магнитная релаксация / Чижик В. И. – С-Пб : Издательство С. – Петербургского университета, 2004. – 388 с. – ISBN 5-288-03406-0.
 19. Стариков, О. Прямой цифрофой синтез частоты и его применение / Стариков О. // Chip News. - 2002. №3. - С56-64
 20. Лобов, В. Цифровые синтезаторы прямого синтеза частот / В. Лобов, В. Стешенко, Б. Шахтарин // Chip News. - 1997. №1. - С16-21
 21. Ридико Л. DDS : прямой цифровой синтез частот // Компоненты и технологии. - 2001. №7. - С50–54.
 22. Куликов, Н. К. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Решение дифференциальных уравнений на основе функций с гибкой структурой / Куликов Н. К., Багаутдинов Г. Н. - Алма-Ата.: - 1973. - 132 с.